Doctorant(e) sur la Compréhension et la modélisation des effets des sollicitations hors-plan sur les composites stratifiés par le procédé AFP, H/F

Descriptif de la mission

Dans le cadre des différents projets de recherche et développement du Groupe SAFRAN, au sein de l'entité SAFRAN Tech, la plateforme SAFRAN Composites est dédiée au développement, à la maturation des technologies composites à matrice organique pour application à des pièces structurales, ainsi qu'à la préparation de leur industrialisation dans le respect d'objectifs technico-économiques ambitieux.

Au sein de son équipe Conception & Développement, SAFRAN Composites est à la recherche d'un(e) doctorant(e) CIFRE sur la Compréhension et la modélisation des effets des sollicitations hors-plan sur les composites stratifiés par le procédé AFP.

Il ou elle aura pour missions principales de :

- Dresser un état de l'art exhaustif de travaux similaires et connexes sur des cibles matériaux ou technologiques d'intérêt pour le groupe.
- Mettre en place des essais mécaniques adaptés pour des sollicitations hors plan des structures
- Identifier et qualifier les mécanismes et les scénarios d'endommagement en tenant compte des effets d'empilements choisis.
- Comprendre et modéliser finement les phénomènes observés expérimentalement à partir de modèles éléments finis avancés.
- Proposer et qualifier des critères sous sollicitations hors-plan, compatibles des méthodes BE pour répondre aux besoins industriels.
- Assurer une communication interne (réunion d'avancement, rapport) et externe (congrès, séminaire) sur les travaux de la thèse, dans le respect des règles de confidentialité.

Profil candidat

L'objectif de ces travaux de thèse est d'alimenter la compréhension et la modélisation de l'effet d'une sollicitation hors-plan sur le comportement et l'endommagement d'une structure stratifié CMO. La finalité industrielle du travail est de pouvoir intégrer des données sur la tenue hors-plan des stratifiés, en vue de l'optimisation de séquences d'empilement sur ces structures. L'influence de la séquence d'empilement sera donc au cœur de ces travaux.

De formation Bac+5 (école d'ingénieur ou master recherche), avec de solides connaissances en mécanique des matériaux (spécifiquement les composites à matrice organique stratifiés) et un gout prononcé pour l'analyse expérimentale et la simulation numérique.

Les compétences suivantes sont indispensables :

- Connaissance des matériaux composites à matrice organique, spécifiquement les composites stratifiés
- Connaissance du calcul mécanique par éléments finis
- Capacité de synthèse et d'exploitation/interprétation des données expérimentales matériaux
- Autonomie et rigueur dans l'exécution de ses activités
- Capacité de communication, notamment avec différents intervenants et différents métiers (chimie, matériaux, procédés…)
- Niveau d'anglais courant

Les compétences suivantes seront fortement appréciées :

- Réalisation d'essais mécaniques sur structures composites
- Utilisation de lois matériaux utilisateur (type UMAT)
- Première expérience en calcul non-linéaire explicite
- Expérience de corrélation essai-calcul

Lieu de la thèse :
Les travaux de thèse s'effectueront à l'Institut Clément Ader (CNRS 5312), Toulouse (https://ica.cnrs.fr/), dans le cadre d'une thèse ISAE-SUPAERO en collaboration avec Safran Composites, Itteville, où le doctorant sera amené à aller régulièrement.

Lien de l'offre :
https://www.safran-group.com/fr/offres/france/itteville/modelisation-sollicitations-hors-plan-composites-stratifies-procede-afp-fh-120055

Personnes à contacter : christophe.bouvet@isae-supaero.fr / william.albouy@safrangroup.com

Sujet détaillé :

Endommagement sous sollicitations hors plan d'un stratifié composite unidirectionnel aéronautique

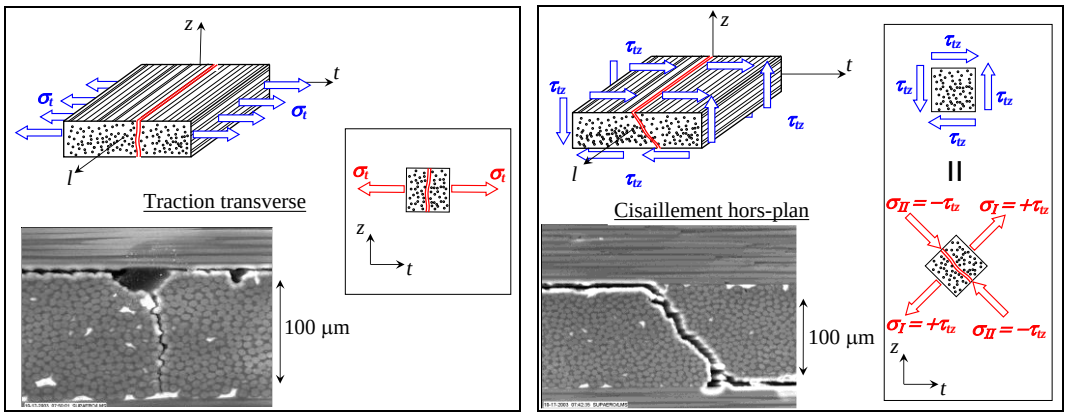
Contexte :

En raison de leurs caractéristiques spécifiques élevées, les matériaux composites, et tout particulièrement les stratifiés unidirectionnels carbone/époxy, sont de plus en plus largement utilisés, en particulier dans le domaine aéronautique ou du transport. Ces structures composites permettent en effet de diminuer la masse de la structure et in fine de réduire l'impact environnemental, et en particulier l'émission de CO_2, au cours de la vie d'un avion. On estime par exemple, sur des avions modernes tels que le Boeing B787 ou l'Airbus A350, que la baisse des émissions de CO_2 sur la durée de vie de l'avion est d'environ 15 à 20% en comparaison d'une structure classique en aluminium [Tim15]. Les structures composites stratifiées à base de fibres de carbone et de résine époxy sont donc largement utilisées en particulier dans les structures primaires des avions, telles que le caisson central, la voilure ou le fuselage. Ces structures sont aussi largement utilisées et d'intérêt pour les motoristes aéronautiques, comme le groupe SAFRAN. Pour fabriquer ces pièces, la technologie AFP se place comme un prétendant de premier ordre, possédant de nombreux avantages en termes de possibilités de stratégie de drapage et d'adaptation des propriétés du stratifié à la sollicitation mécanique supportée par la pièce. Dans ce contexte, l'optimisation de stratification est une étape indispensable pour obtenir des pièces concurrentielles en termes de coût et de masse. Afin d'obtenir des solutions compétitives, l'étape d'optimisation nécessite de parfois relâcher certaines règles de drapage. En connaissant les conséquences des effets d'empilement, il est primordial de se poser la question de la tenue mécanique de ses solutions. Si les conséquences dans le plan sont relativement bien connues [Nic23], l'influence sur la tenue hors-plan est, elle, plus difficile à prévoir. De plus, de par leur complexité, les calculs de structures menant au dimensionnement ou à l'optimisation des structures sont généralement basés, pour le stratifié, sur des éléments coques ne donnant que peu ou pas d'informations sur les contraintes hors-plan.

Cependant, les matériaux composites stratifiés sont particulièrement sensibles à ce type de chargement (flexion ou impact) [Abr98, Pau95, Rou90]. Les caractéristiques mécaniques dans le plan du stratifié sont directement liées aux caractéristiques mécaniques de la fibre de carbone, et à ce titre sont donc non seulement particulièrement élevées, mais peuvent également, comme il a été énoncé plus tôt, être conçues sur mesure en fonction des sollicitations extérieures. Différemment, les caractéristiques mécaniques hors plan sont, elles, directement liées aux propriétés mécaniques de la résine et sont donc bien moins élevées que les caractéristiques planes. Dans la pratique, les sollicitations hors plan vont induire dans le stratifié des contraintes de traction et de cisaillement qui vont elles-mêmes provoquer différents endommagements tels que des fissurations matricielles, des délaminages et des ruptures de fibres.

Ces deux endommagements matriciels, que sont la fissuration matricielle et le délaminage, présentent des interactions importantes l'une avec l'autre. On peut citer par exemple le cas de l'impact, largement étudié depuis plusieurs dizaines d'années où l'on montre que les premiers endommagements à apparaître sont des fissurations matricielles, soit situées à mi-épaisseur liées aux contraintes de cisaillement hors plan importantes au milieu du stratifié, soit dans la partie inférieure du stratifié liées aux contraintes normales de traction induites par la flexion de la plaque lors de l'impact (*Figure 1*, *Figure 2*) [Abr98, Bou18, Cha87, Muj07]. Une fois ces premières fissures matricielles apparues, leurs propagations jusqu'aux interfaces inférieures et supérieures vont alors induire des délaminages importants et réduire fortement la rigidité de flexion du stratifié, ainsi que ses caractéristiques résiduelles [Ast07, Cha87, Lop09, Per99, Tro94]. Dans le cas de l'impact, ces endommagements sont suivis, plus ou moins rapidement, par des ruptures de fibres en traction

sur la face non impactée et/ou en compression sur la face impactée. Et il est largement montré dans la littérature, que pour modéliser les endommagements d'impact, et en particulier simuler la forme très particulière des délaminages observés avec une forme globalement conique et une direction des délaminages orientés avec la direction des fibres du pli inférieur, la prise en compte de la fissuration matricielle ainsi que l'interaction qu'il existe entre cette fissuration matricielle et le délaminage, sont primordiales [Bou09, Cha87, Lop09, Wis12].



-a- *-b-*

Figure 1 : Les deux types de fissuration matricielle : fissure transverse due à une traction transverse σ_t (a) et fissure à 45° due à un cisaillement hors plan τ_{tz} (b) [Bou18]

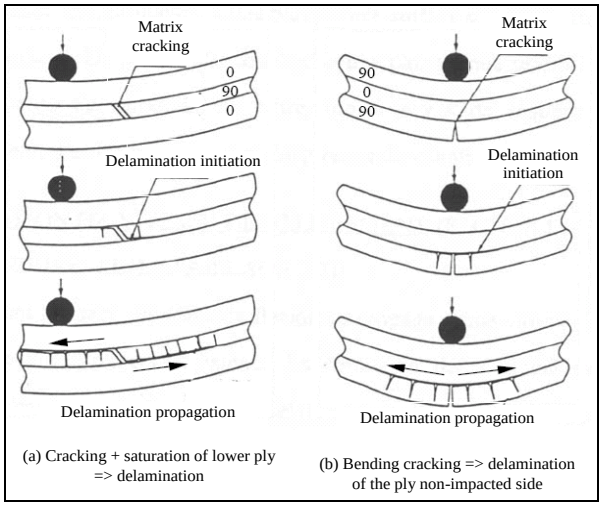


Figure 2 : Scénario d'endommagement sous impact d'un stratifié UD $[0,90]_S$ [Cha87]

Un autre exemple de sollicitation hors plan est la sollicitation de flexion trois points qui est largement utilisée pour la détermination des caractéristiques mécaniques hors plan des stratifiés composites [Ast17, Muj07]. Cette flexion induit dans le stratifié des contraintes de cisaillement hors plan, qui elles-mêmes induisent des fissurations matricielles, qui elles-mêmes induisent des délaminages au niveau des interfaces ; à ce titre, le scénario d'endommagement est finalement assez proche de celui d'impact. Cette interaction forte entre la fissuration matricielle et le délaminage fait de ces caractéristiques de cisaillement hors plan des caractéristiques intrinsèquement liées au type de drapage utilisé. Par exemple, dans le cas d'un drapage $[0,90]_S$, on observe en premier lieu des fissures à 45° dues au cisaillement hors plan dans les plis centraux à 90° qui vont ensuite induire un délaminage au niveau de l'interface 0/90 inférieure et 90/0 supérieure (*Figure 3*) [Hon14]. Ce type d'essai permet donc logiquement de déterminer la contrainte à rupture en cisaillement hors plan de la matrice, τ_{tz}^r, où *t* est la direction transverse et *z* la direction hors plan (*Figure 1*) [Ast17]. En complément, d'autres essais, tels que l'essai en cisaillement trois points rapprochés (ILSS), sont en général

réalisés sur des drapages de type $[0_n]$ avec tous les plis orientés selon la même direction [Ast22a]. L'objectif étant dans ce cas de déterminer la contrainte à rupture en cisaillement hors plan, τ_{lz}^{r}, où l est la direction longitudinale du stratifié. On peut néanmoins s'interroger sur la signification physique de cette contrainte de cisaillement hors plan ; dans la pratique un stratifié présentant toujours des plis consécutifs de différentes orientations, il apparaîtra forcément une fissuration matricielle préalable qui induira du délaminage avec finalement une rupture en cisaillement hors-plan due à la rupture de fibres en cisaillement.

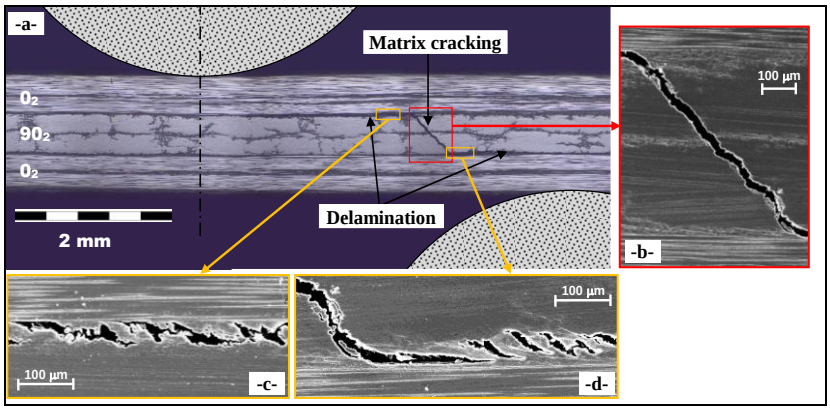


Figure 3 : Interaction fissuration matricielle/délaminage lors d'un essai de flexion 3 points sur stratifié $[0,90]_S$ [Hon14]

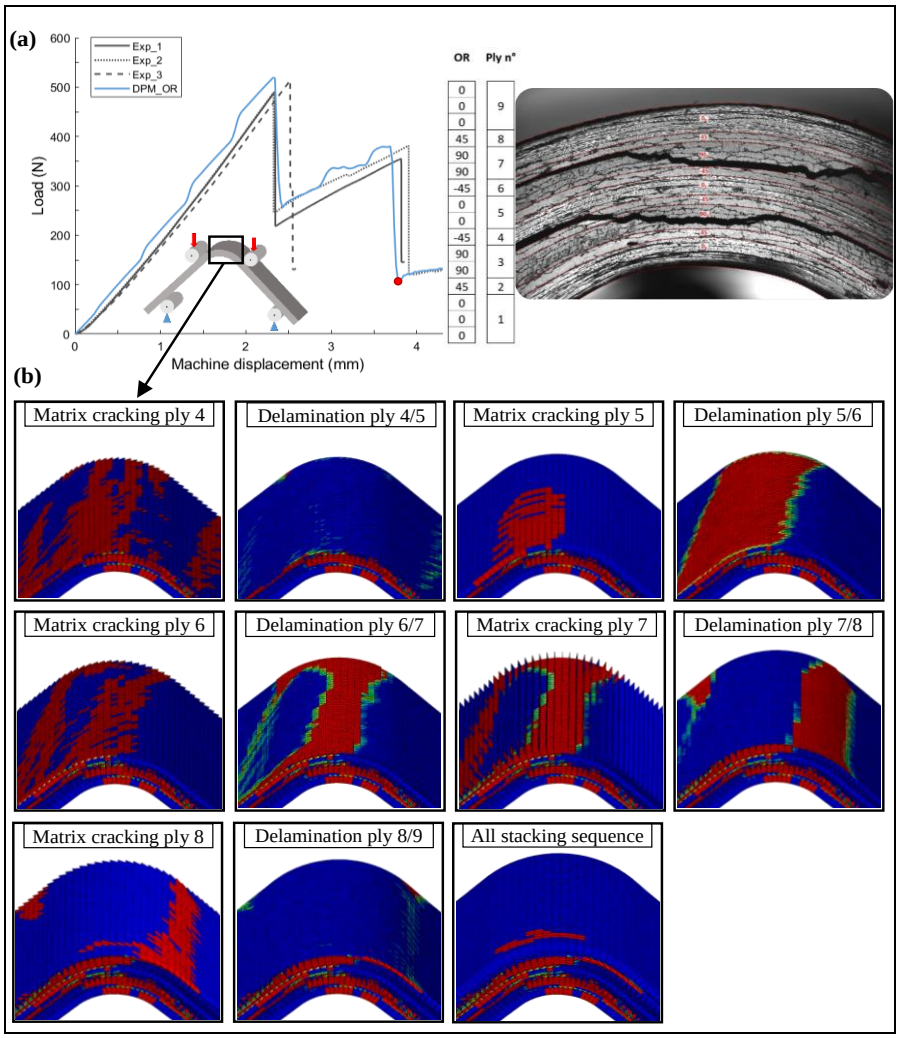


Figure 4 : Scénario d'endommagement d'un dépliage de cornière en flexion 4 points et comparaison avec le DPM [Jou20]

Un autre exemple de chargement où la sollicitation de cisaillement hors plan revêt une grande importance est celui du dépliage de cornière (Figure 4) [Ast22b, Jou20, Ked89, Pau95]. Dans ce cas on observe, lorsque la cornière est sollicitée en flexion 4 points, des contraintes de cisaillement et de traction hors plan importantes dans le rayon de courbure (Figure 5) [Cha16] et donc, comme dans le cas de la flexion trois points, un développement de fissurations matricielles à mi-épaisseur dues à ce cisaillement induisant rapidement, voire dans le même temps, un délaminage des interfaces supérieures et inférieures. Afin de rendre compte de ce type de morphologie d'endommagement, il est donc nécessaire, à la fois de prendre en compte la rupture en cisaillement de la matrice, mais également le couplage de celle-ci avec les délaminages [Jou20].

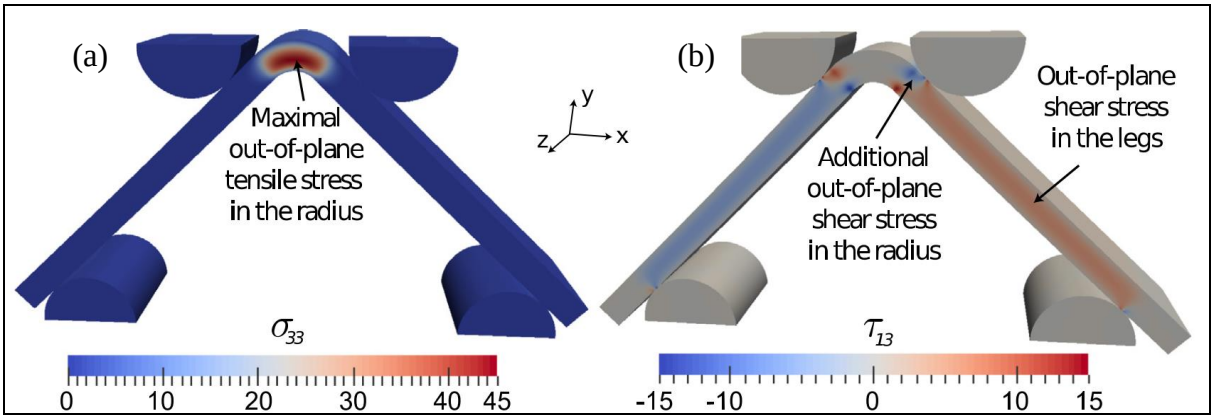


Figure 5 : Contraintes de traction hors plan (a) et de cisaillement hors plan (b) lors d'un dépliage de cornière en flexion 4 points [Cha16]

Ces différents essais en sollicitations hors plan permettent de mettre en évidence l'importance de ce type de chargement sur la ruine d'un stratifié composite unidirectionnel. Il existe néanmoins de nombreux cas où cet endommagement en cisaillement hors-plan est dû à des sollicitations planes et à des effets de bord, et en particulier aux contraintes de cisaillement interlaminaires, typiquement au niveau d'un bord libre ou d'un trou utilisé pour un assemblage. Même si ce cas des bords libres ne fait pas partie de la présente thèse, les sollicitations hors plan induites en bord d'assemblage peuvent également induire de l'endommagement en zone courante. On constate par exemple que la contrainte de compression selon z générée par le serrage de la vis va limiter les fissurations matricielles et les délaminages, et peut donc déplacer les endommagements induits par ces contraintes hors plan en dehors de cette zone. On peut donc dans ce cas observer juste après la zone concernée par le serrage l'apparition de fissuration matricielle et de délaminage, puis de ruptures de fibres. Ce cas permet de mettre en lumière l'influence d'une contrainte de compression selon la direction hors-plan sur le délaminage et en particulier sur la rupture en mode II de l'interface ; la ténacité en mode II, GIIC, est en effet fortement augmentée par la présence d'une contrainte de compression selon z [Li08, Xu18]. Cet effet est également présent lors d'un essai d'impact ou de flexion trois points dans la zone concernée par l'introduction des efforts, soit sous l'impacteur pour l'essai d'impact ou sous le cylindre central pour un essai de flexion 3 points. Cet effet de l'augmentation du GIIC dû à la contrainte de compression hors plan semble donc être un point important à prendre en compte lors de ce travail de thèse.

D'un point de vue numérique, un modèle prenant en compte le caractère discret de la fissuration matricielle est développé depuis une vingtaine d'années au sein de l'Institut Clément Ader (*Figure 6*) [Bou09, Jou20, Ser23]. Ce modèle, appelé DPM (Discrete Ply Model), modélise les fissurations matricielles à partir d'éléments d'interfaces et permet ainsi de rendre compte de façon géométrique, et automatique, de l'interaction fissuration matricielle / délaminage. Il a été initialement développé afin de rendre compte de cette interaction lors d'une sollicitation d'impact et permet ainsi de simuler la forme et l'étendue des délaminages lors d'un impact (*Figure 7*) [Hon13]. En particulier des phénomènes tels que la forme conique en double hélice

des délaminages selon l'épaisseur du stratifié, la propagation du délaminage selon l'orientation du pli inférieur ou l'effet de la rupture de fibres sur le délaminage, sont correctement rendus.

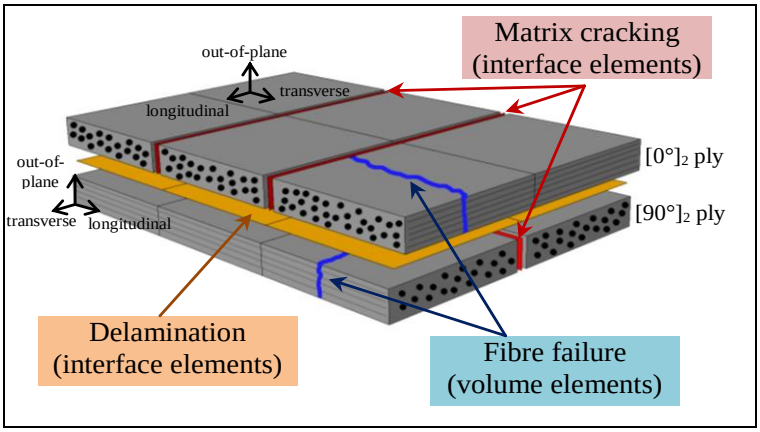


Figure 6 : Principe du DPM avec prise en compte des endommagements de fissuration matricielle, délaminage et rupture de fibres [Bou09]

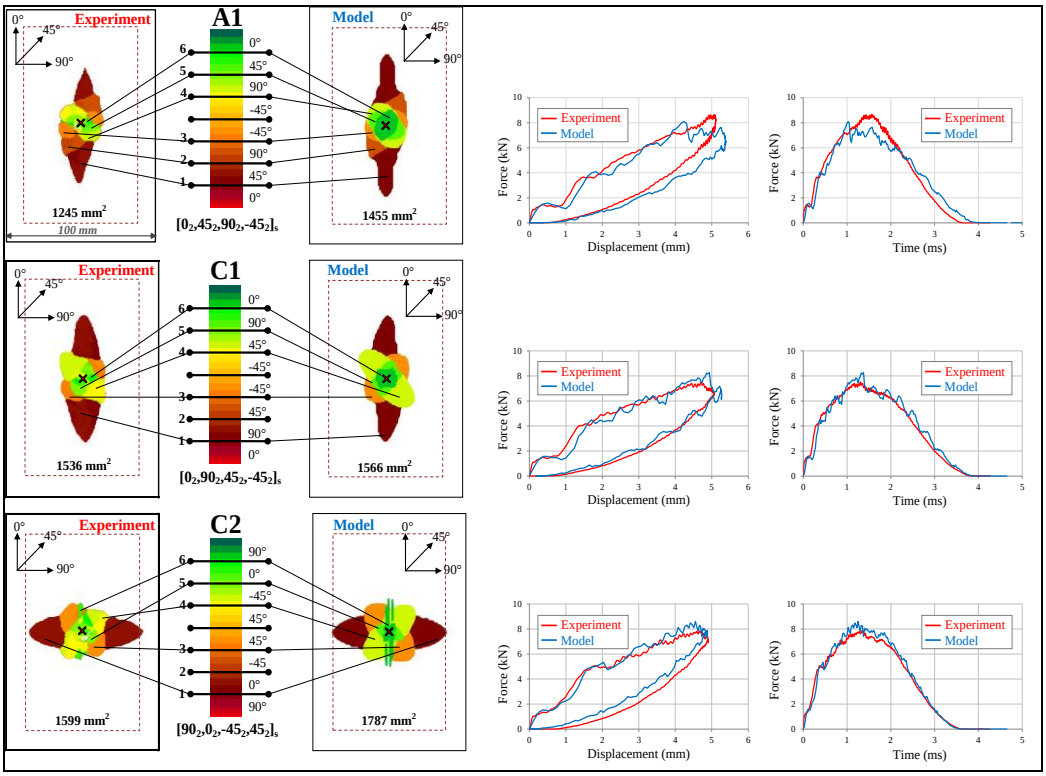


Figure 7 : Comparaison essai/modèle d'essais d'impact sur stratifié carbone/époxy et effet du drapage [Hon13]

Ce modèle a également été utilisé afin de simuler un essai de flexion 3 points sur un stratifié $[0,90]_S$ et permet encore une fois de bien rendre compte de l'interaction entre la fissuration matricielle du pli central et les délaminage associés (*Figure 8*) [Hon14]. Plus récemment le DPM a été utilisé afin de modéliser des essais de dépliage de cornière, avec ou sans défaut de fabrication, et permet encore une fois de bien rendre compte du scénario d'endommagement (*Figure 4*) [Jou20]. Dans la version actuelle du DPM, un effet de la contrainte de compression hors plan sur la ténacité en mode II des interfaces est pris en compte grâce à des essais de la littérature [Li08, Xu18] ; néanmoins ce point reste encore à confirmer et cette interaction devra être étudiée plus en détails lors de cette thèse.

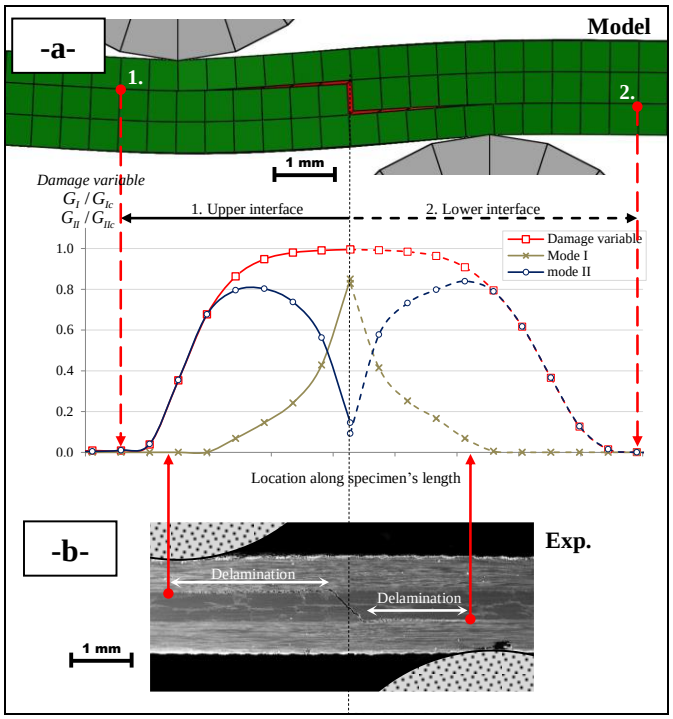


Figure 8 : Essai de flexion 3 points sur stratifié [0,90]$_S$ et dialogue essai/calcul avec le DPM [Hon14]

Descriptif de la thèse :

L'objectif de cette thèse sera d'étudier l'effet d'une sollicitation hors plan sur l'endommagement d'un stratifié unidirectionnel carbone/époxy, et en particulier le couplage entre la fissuration matricielle et le délaminage, ainsi que l'effet d'une compression sur ces 2 endommagements et sur le couplage associé.

La première étape consistera à travailler sur un essai 2D afin de faciliter l'observation expérimentale du phénomène. Il s'agira donc d'utiliser un stratifié unidirectionnel composé uniquement de plis à 0° et à 90°, afin de garantir le caractère 2D du problème, sollicité sous un chargement hors plan de type flexion. L'essai de flexion 3 points semble évidemment tout à fait indiqué, mais d'autres essais du type flexion 4 points, essai de poinçonnement, avec ou sans traction additionnelle, pourront être envisagés. Il s'agira de choisir un, ou plusieurs essais complémentaires, permettant d'induire différents scénarios d'endommagements et couplages associés. L'essai de flexion 3 points pourra par exemple être réalisé avec différents drapages, différentes longueurs entre appuis ou différentes formes d'indenteur afin de jouer sur la zone centrale concernée par la compression selon *z*. A ce titre, l'essai de poinçonnement pourrait permettre de localiser la zone d'endommagement, et donc de concentrer la zone en compression hors plan. Une traction additionnelle permettrait d'induire, ou non, une fissuration préalable à l'essai, et donc influencer le scénario d'endommagement et le couplage fissuration / délaminage.

L'objectif de cette première étape est à la fois de choisir un essai permettant d'influencer le scénario d'endommagement, mais également de permettre un suivi aisé des endommagements lors de la sollicitation, à l'aide de différents moyens d'observation complémentaires, tels que des caméras classiques, de la corrélation d'images ou de la thermographie infrarouge. Un dialogue essai / calcul devra également être mené en parallèle afin de mieux comprendre les scénarios d'endommagement mais également de concevoir les essais les mieux adaptés aux phénomènes recherchés. Pour ce faire, le DPM sera utilisé et devra être adapté à ces différents cas.

Lors de cette première étape il semble important de disposer d'un essai permettant de quantitativement évaluer l'influence de la compression selon *z*, σ_{zz}, sur le taux de restitution d'énergie critique en mode II, G_{II}^C. Cet effet est en effet encore mal compris dans la littérature et reste un paramètre critique sur le scénario

d'endommagement d'un stratifié sous sollicitation hors plan. Quelques essais existent dans la littérature [Xu18] mais aucun standard ne se dégage et la question du dépouillement de ce type d'essai reste encore largement ouverte [Li18, Pau95].

La seconde étape consistera à revenir sur un essai 3D, beaucoup plus réaliste par rapport aux cas observés industriellement ; les essais d'indentation, d'impact ou de poinçonnement semblent particulièrement adaptés. La différence majeure de ces essais par rapport aux essais 2D est de ne pas présenter de bord ; l'endommagement s'initie donc directement au cœur du stratifié, contrairement aux essais 2D où la présence des bords, très utile pour observer les endommagements, tend à initier les endommagements. Dans le même temps le suivi des endommagements est évidemment rendu beaucoup plus complexe par le fait que les endommagements ne sont pas débouchants. On pourrait néanmoins envisager de réaliser des essais d'indentation sous tomographe RX pour avoir un suivi in situ et 3D des endommagements. Ce type de suivi a déjà été réalisé, par exemple dans le cadre d'une collaboration avec l'université de Bath [Shi17] (*Figure 9*).

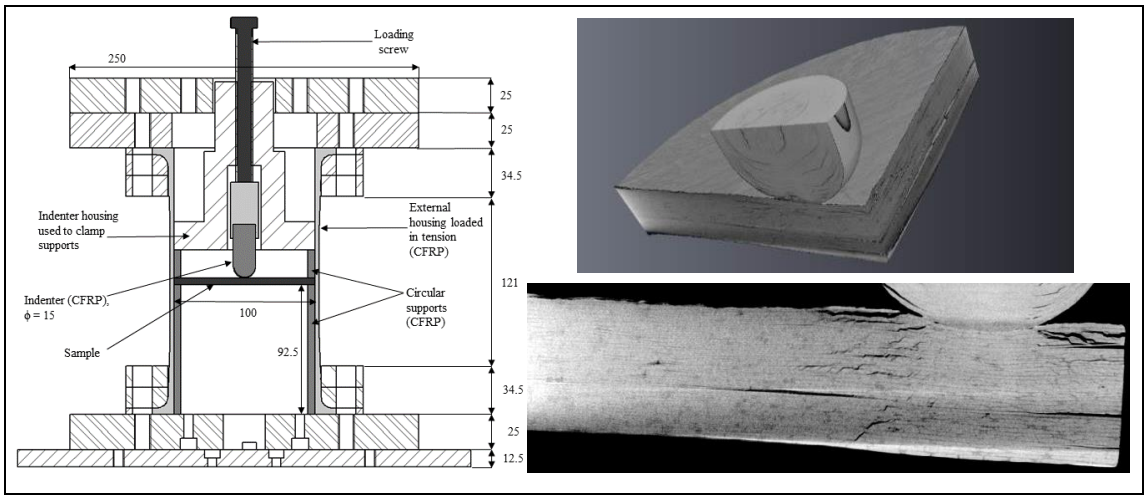


Figure 9 : Essai d'indentation d'un stratifié carbone/époxy réalisé dans un tomographe RX à l'aide d'un indenteur en carbone [Shi17]

Lors de cette seconde étape l'essai choisi devra encore une fois permettre d'étudier l'effet de la compression hors plan sur le scénario d'endommagement, et en particulier sur le couplage fissuration matricielle / délaminage. Pour ce faire, un essai d'indentation, permettant de jouer sur les conditions limites, la forme de l'indenteur et le drapage du stratifié, semble adapté. L'essai de poinçonnement peut également être une alternative à l'indentation, permettant ainsi de confiner les contraintes hors plan, et le développement des endommagements associés. La sollicitation du stratifié à une contrainte de traction, préalable ou au cours de l'essai, permettra également d'initier une fissuration matricielle et donc d'étudier cet effet sur le scénario d'endommagement.

Un dialogue essai / calcul devra également être mené afin de mieux analyser les scénarios d'endommagements, et en particulier de vérifier que le modèle mis en place vis-à-vis de l'effet de la compression sur G_{II}^{C} lors de l'étape précédente permet de correctement rendre compte des phénomènes observés. Il s'agira également d'étudier l'effet du drapage sur le scénario d'endommagement, et en particulier de paramètres connus pour influencer la fissuration matricielle et le délaminage tels que l'épaisseur des plis, l'angle entre plis adjacents, la direction de propagation du délaminage vis-à-vis de celle des plis adjacents ou la position des plis selon l'épaisseur.

Enfin la dernière étape de la thèse consistera à utiliser les modélisations développées pour chalenger des critères d'endommagement émanant d'un modèle par éléments finis plus standard, utilisé industriellement. L'objectif d'utiliser un modèle par éléments finis tel que le DPM semble en effet encore trop complexe au

niveau industriel, en particulier à cause du manque de maturité de ce type de modélisation mais également simplement du temps de calcul encore trop important pour des structures réelles. Il s'agira par exemple d'utiliser ce modèle pour générer des abaques qui pourront ensuite être utilisés comme critère de rupture sur des calculs par éléments finis standards. Ces derniers pourront être utilisés, dans le cadre d'optimisation de stratification et donner une indication sur la tenue du stratifié en hors-plan.

Bibliographie :

[Abr98] S. Abrate, Impact On Composite Structures, Cambridge University Press, 1998.

[Ast07] ASTM D7136/D7136M. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. 2007

[Ast12] ASTM D7137/D7137M. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates, 2012.

[Ast17] ASTM D790-17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 2017

[Ast22a] ASTM D2344M-22. Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. 2022

[Ast22b] ASTM D6415M-22. Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite. 2022

[Bou09] C. Bouvet, B. Castanié, M. Bizeul, J.J. Barrau. Low velocity impact modeling in laminate composite panels with discrete interface elements, International Journal of Solids and Structures, Vol. 46, Issues 14-15, pp. 2809-21, 2009

[Bou18] C. Bouvet. Dimensionnement des structures composites : applications à l'aéronautique, ISBN: 978-1-78405-348-2, 316 p., ed. ISTE, 2018, https://iste-editions.fr/products/dimensionnement-des-structures-composites

[Cha16] J. S. Charrier, F. Laurin, N. Carrère, and S. Mahdi, Determination of the out-of-plane tensile strength using four-point bending tests on laminated L-angle specimens with different stacking sequences and total thicknesses, Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., vol. 81, pp. 243–253, 2016.

[Cha87] Chang F.K. and Chang K.Y., A progressive damage model for laminate composites containing stress concentrations, Journal of Composite Materials, pages 834-855, 1987

[Che06] Chen P, Shen Z, Xiong J, Yang S, Fu S, Ye L. Failure mechanisms of laminated composites subjected to static indentation. Compos Struct 2006;75(1-4):489-495.

[Hon13] N. Hongkarnjanakul, C. Bouvet, S. Rivallant, Validation of low velocity impact modelling on different stacking sequences of CFRP laminates and influence of fibre failure, Composite Structures, Vol. 106, pp. 549-59, 2013

[Hon14] N. Hongkarnjanakul, S. Rivallant, C. Bouvet, A. Miranda, Permanent indentation characterization for low-velocity impact modelling using three-point bending test, Journal of Composite Materials, Vol. 48-20, pp. 2441-54, 2014

[Jou20] P. Journoud, C. Bouvet, B. Castanié, F. Laurin, L. Ratsifandrihana, Experimental and numerical analysis of unfolding failure of L-shaped CFRP specimens, Composite Structures, Vol. 232, N° 111563, 2020

[Ked89] K. T. Kedward, R. S. Wilson, and S. K. McLean, Flexure of simply curved composite shapes, Composites, vol. 20, no. 6, pp. 527–536, 1989.

[Li08] *Li X, Hallett SR, Wisnom MR. Predicting the effect of through-thickness compressive stress on delamination using interface elements. Compos Part A: Appl Sci Manuf 2008;39(2):218-230.*

[Lop09] *C.S. Lopes, P.P. Camanho, Z. Gurdal, P. Maimi, E.V. Gonzalez, Low-Velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: numerical simulations, Compos. Sci. Technol. 69 (7–8) (2009) 937–947.*

[Muj07] *Mujika, F. On the effect of shear and local deformation in three-point bending tests. Polym Test, 2007;26(7):869-877.*

[Nic23] *M. Nicol Compréhension et modélisation de l'influence de l'ordre d'empilement sur les scenarios d'endommagement dans des composites stratifies de plis unidirectionnels, Thèse, ONERA, Université Paris Saclay, 2023.*

[Per99] *P. Perugini, A. Riccio, F. Scaramuzzino, Influence of delamination growth and contact phenomena on the compressive behavior of composite panels, J. Compos. Mater. 33 (15) (1999) 1433–1456.*

[Pau95] *P. C. Paul, C. R. Saff, K. B. Sanger, M. A. Mahler, H. P. Kan, and E. F. Kautz, Out of plane analysis for composite structures, NASA Tech. report, NASA Langley Res. Center, Eighth DOD(NASA)FAA Conf. Fibrous Compos. Struct. Des. Part 1; p 263-279, pp. 263–279, 1995.*

[Rou90] *J. Rouchon. Certification of Large Aircraft Composite Structures, Recent Progress and New Trends in Compliance Philosophy, presented at the 17th ICAS, Stockholm, Sweden, 1990.*

[Ser23] *J. Serra, C. Bouvet, P.K. Haridas, L. Ratsifandrihana, Numerical simulations of combined size effects acting on an open-hole laminated composite plate under tension, Journal of Composite Materials, Vol. 57(2), pp. 213-233, 2023*

[Shi17] *H. Shi, A. Sandhu, A.T. Rhead, N. Dubary, C. Bouvet, The effect of ply blocking on near and on-edge impact damage and compression failure mechanisms, 21th ICCM, Xi'an (China), August 20-25, 2017*

[Tim15] *A.J. Timmis, A. Hodzic, L. Koh, M. Bonner, C. Soutis, A.W. Schafer, L. Dray, Environmental impact assessment of aviation emission reduction through the implementation of composite materials, Int J Life Cycle Assess, Vol. 20, pp. 233-243, 2015.*

[Tro94] *A. Tropis, M. Thomas, J.L. Bounie, P. Lafon, Certification of the composite outer wing of the ATR72, J. Aerosp. Eng. Proceed. Inst. Mech. Eng. Part G 209 (1994) 327–339.*

[Wis12] *Wisnom M.R., The role of delamination in failure of fibre-reinforced composites, Philosophical Transaction of the Royal Society, Vol. 370, pages 1850-1870, 2012*

[Xu18] *Xu X, Wisnom MR, Sun X, Rev T, Hallett SR. Experimental Determination of Through-Thickness Compression (TTC) Enhancement Factor for Mode II Fracture Energy. Compos Sci and Tech 2018; 165:66-73.*